

PERKEMBANGAN RISET ENERGI FUSI

Mukhis Akhadi¹⁾

ABSTRAK

PERKEMBANGAN RISET ENERGI FUSI.. Reaksi fusi diyakini merupakan satu satunya sumber energi bagi matahari, dan bintang-bintang lainnya. Reaksi itu melibatkan penggabungan empat buah inti H membentuk satu buah inti He. Dalam usaha mencari sumber energi bam yang bersih dan ramah lingkungan, manusia berupaya meniru proses fusi dalam matahari. Untuk mendapatkan proses fusi terkendali di muka bumi, manusia mengembangkan reaktor fusi yang disebut tokamak. Beberapa penelitian yang berhubungan dengan energi fusi telah dilakukan dengan hasil yang cukup memuaskan. Jika kelak teknologi fusi benar-benar dapat dihadirkan di muka bumi, maka reaksi fusi akan berperan sebagai sumber energi bam yang sangat bersih dengan persediaan hampir tanpa batas. Tulisan ini akan membahas perkembangan dalam riset energi fusi yang berlangsung hingga saat ini.

ABSTRACT

DEVELOPMENT IN FUSION ENERGY RESEARCH. Fusion reaction was believed as the only energy source for sun and other stars. The reaction involve fusion of four H nuclei to become one He nuclei. In the effort to find clean and environmentally safe new energy source, people make any effort to imitate fusion process in the sun. To find controlled fusion process at earth surface, people developed fusion reactor named tokamak. Experiments on fusion reaction have been carried out with quite satisfaction results. If fusion technology truly can be presented at earth surface in the future, fusion reaction will play an important role as a very clean new energy source, with nearly unlimited supply. This paper will describe development in fusion energy experiment that have taken place till this time.

Pendahuluan

Suplai energi dalam bentuk pancaran radiasi elektromagnetik dari matahari mencirikan kontibusi yang sangat besar terhadap kehidupan di muka bumi. Tumbuhan hijau menangkap energi sinar matahari (E_{hv}) dan digunakan untuk memproduksi karbohidrat ($C_6H_{12}O_6$), dari air (H_2O) dan gas carbon dioksida (CO_2) melalui proses fotosintesa. Peran lain yang dimainkan oleh matahari di muka bumi adalah penguapan air laut sehingga timbul hujan, berperan dalam menghasilkan angin serta beberapa fungsi lain yang cukup vital bagi kehidupan. Bahkan sumber-sumber energi

berupa bahan bakar fosil yang saat ini dimanfaatkan oleh manusia, seperti minyak bumi dan batu bara, pada prinsipnya merupakan bentuk kuno energi matahari yang digunakan oleh tumbuh-tumbuhan dan mikroorganisme plankton di masa lampau. Pembangkit listrik tenaga air yang mengkonversikan air terjun menjadi listrik, juga bergantung pada matahari. Tanpa daur cuaca yang disebabkan oleh matahari, tidak akan ada hujan turun, sehingga tidak akan ada sumber air terjun yang dapat menggerakkan turbin pembangkit listrik tersebut. Pertanyaan yang muncul dari

¹⁾ Peneliti Madya Bidang Fisika PSPKR-BA TAN

kenyataan tersebut adalah: dan mana matahari itu memperoleh sumber energi?

Ada beberapa kemungkinan yang dikemukakan untuk mencoba menerangkan sumber energi bagi matahari. Tetapi dari beberapa hipotesis yang dikemukakan, ternyata tidak satupun yang mampu menjawab pertanyaan tadi secara memuaskan. Reaksi kimia tidak mungkin mampu berperan sebagai sumber energi bagi matahari. Andaikata matahari dengan massa sekitar 2×10^{30} kg tersusun atas carbon mumi atau batubara, maka pembakaran carbon secara sempurna hanya mampu mensuplai energi untuk mempertahankan pancaran energinya selama beberapa ratus tahun, paling lama 1000 tahun saja.

Kemungkinan sumber energi yang lain bagi matahari adalah perubahan energi gravitasi menjadi panas. Namun bukti-bukti menunjukkan bahwa jika terjadi kontraksi pada tubuh matahari, hal itu hanya akan mampu mensuplai satu persen dari total energi yang dipancarkan matahari. Di samping itu, jika energi gravitasi merupakan satu-satunya sumber energi, matahari tidak akan berumur lebih dari 10 juta tahun saja. Pada saat Charles Darwin dan para ahli geologi abad ke-19 berpendapat bahwa kehidupan di muka bumi telah berlangsung paling tidak mulai dari ratusan juta tahun silam, para ahli fisika seperti Lord Kelvin dan Herman von Helmholtz (tahun 1850-an) tidak melihat adanya sumber energi yang mampu mempertahankan matahari bersinar demikian lama. Para fisikawan pada saat itu berpandangan bahwa sumber energi bagi matahari berasal dari energi gravitasi, yaitu terjadinya kontraksi atau penciutan volume matahari. Menurut teori ini, energi gravitasi yang dilepaskan mencruskan tekanan gas matahari ke dalam suatu volume yang semakin lama semakin kecil. Helmholtz memperhitungkan bahwa pengurangan pada diameter matahari sekitar 5m/tahun akan mempertahankan tingkat pancaran energi matahari selama 25 juta tahun mulai dari saat kelahirannya.

Perkembangan dalam bidang ilmu pengetahuan, terutama bidang astrofisika,

mengantarkan manusia mendapatkan bukti-bukti baru mengenai matahari. Dari data-data astronomi diperoleh informasi bahwa matahari telah memancarkan energinya sejak kira-kira 4,5 milyar tahun silam. Ketidakmampuan manusia menemukan sumber energi konvensional bagi matahari, mendorong manusia menduga bahwa proses nuklir merupakan satu-satunya sumber energi bagi matahari yang dapat diterima. Hal ini didasari oleh kenyataan bahwa reaksi nuklir mampu membebaskan energi dalam jumlah yang sangat besar, dan hanya dengan proses nuklir ini produksi energi dalam matahari dapat dijelaskan secara memuaskan.

Pertanyaan berikutnya mengenai sumber energi bagi matahari, ini adalah reaksi nuklir jenis apakah yang terjadi di dalam tubuh matahari? Data-data astrofisika yang telah terkumpul menunjukkan bahwa jumlah unsur-unsur berat dalam matahari terlalu kecil dibandingkan dengan laju pancaran energi dan umur matahari. Oleh sebab itu, reaksi fisi nuklir dalam bentuk pembelahan unsur-unsur berat seperti U-235 tidak mungkin dapat berperan sebagai sumber energi bagi matahari. Dari hasil penyelidikan diketahui bahwa matahari tersusun atas (75% H, 24% He, 2% unsur-unsur organik seperti C, N, dan O, sedang sisanya 0,5% berupa unsur-unsur logam seperti Mg, Si dan Fe).

Dari data tadi terlihat bahwa lebih dari 70% tubuh matahari tersusun atas unsur-unsur ringan H dan He. Oleh sebab itu, ditilik dari komposisi materi penyusunannya, reaksi nuklir dalam matahari pasti melibatkan unsur-unsur tersebut. Sedang sifat-sifat fisika dari kedua elemen tersebut ternyata sangat mendukung dugaan ini, Reaksi ini diperkenalkan pertama kali pada tahun 1911 oleh Hans Bethe. Fisikawan berkebangsaan Jerman-Amerika. Bethe menemukan suatu jenis reaksi nuklir dalam bentuk penggabungan (reaksi fusi) inti-inti atom H membentuk inti atom He 4.

Produksi Energi Pada Bintang

Oalam ini bintang yang baru lahir, gravitasi menghasilkan suhu yang sangat tinggi yang dibutuhkan untuk menggabungkan inti-inti atom H. Dalam serangkaian reaksi termonuklir, empat inti H akan membentuk satu inti He. Rantai reaksi tadi yang juga disebut siklus hidrogen-hidrogen (H-H). Berikut ini diberikan persamaan reaksi fusi di dalam matahari yang merupakan gabungan reaksi dalam siklus H-H, yaitu :



Massa inti He yang terbentuk ternyata lebih ringan dari pada jumlah massa keempat inti H penyusunnya. Hal ini berarti ada sebagian massa yang berubah menjadi energi. Energi yang dilepaskan oleh reaksi fusi tersebut dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (4.51) :

$$\begin{aligned} \text{Massa 4 inti H} &= 4.03279 \text{ sma} \\ \text{Massa 1 inti He} &= 4.00151 \text{ sma} \\ \text{Selisih massa} &= 0.03128 \text{ sma} \end{aligned}$$

Karena $1 \text{ sma} = 931.494 \text{ MeV}$, maka total energi yang dilepaskan oleh penggabungan 4 H membentuk 1 He adalah: $0.03128 \text{ sma} \times 931.494 \text{ MeV/sma} = 29.1 \text{ MeV}$ atau $4.7 \times 10^{14} \text{ erg}$. Dengan pelepasan energi tersebut, setiap pembakaran 1 kg H mampu melepaskan $6.3 \times 10^{14} \text{ erg}$. Materi yang hilang ketika empat inti H membentuk inti He di matahari adalah sekitar tujuh ton untuk setiap 100 ton H yang diproses.

Kecepatan reaksi fusi pada bintang bergantung pada temperatur dan jumlah inti atom persatuan volume. Semakin tinggi temperatur akan semakin cepat gerakan inti sehingga akan lebih sering terjadi tumbukan antar inti-inti. Diperkirakan proses fusi 4 H membentuk 1 He itu terjadi dalam matahari dengan laju $5 \times 10^{11} \text{ kg}$ tiap detik, dengan pelepasan energi $3.7 \times 10^{26} \text{ J}$ per detiknya. Dari jumlah tersebut kira-kira hanya $1 \times 10^{17} \text{ J}$ tiap detiknya jatuh pada permukaan bumi, sebagian besar dalam bentuk energi elektromagnetik. Meskipun demikian, jumlah energi yang jatuh di bumi ini ternyata 10

kali lebih besar dibandingkan total energi yang dibangkitkan di permukaan bumi.

Reaksi Fusi Terkendali

Dilihat dari sudut konsep, proses terjadinya reaksi fusi memang cukup sederhana. Namun, reaksi fusi yang terkendali masih sangat sulit untuk diwujudkan karena masih banyak kendala yang harus diselesaikan. Sebagaimana dalam reaksi nuklir jenis fisi, pada reaksi fusi ini juga dikenal adanya reaksi berantai terkendali dan tak terkendali. Proses fusi berantai tak terkendali memang sudah dapat diwujudkan di permukaan bumi dalam bentuk ledakan bom hidrogen (1.80m yang ditemukan oleh *Alexander Sakharov* - fisikawan berkebangsaan Rusia yang juga dijuluki sebagai bapak bom hidrogen - memang bekerja memanfaatkan proses fusi. Uji coba bom nuklir jenis fusi mulai dilakukan baik oleh Amerika Serikat, Rusia, Inggris, dan Prancis pada sekitar tahun 1950-an.

Pertanyaan lain yang muncul adalah dengan proses fusi dalam matahari adalah mengapa matahari tidak meledak seperti halnya bom hidrogen? Jawaban untuk pertanyaan tersebut adalah karena laju reaksi fusi di dalam matahari demikian lambatnya. Sepotong materi penyusun matahari dengan ukuran sebesar tubuh manusia akan melakukan reaksi fusi dan membakar habis seluruh materi tersebut dengan laju yang lebih lambat dibandingkan laju perubahan makanan menjadi energi di dalam tubuh manusia (17). Hal ini menunjukkan bahwa reaksi fusi di matahari berbeda kecepatannya dengan reaksi fusi ledakan bom hidrogen. Di samping itu, fusi nuklir dalam matahari, memang merupakan penggabungan 4 buah inti H membentuk He yang berlangsung sangat lambat, sedang pada bom hidrogen, reaksi fusi terjadi antara inti deuterium (D) dan Tritium (T) yang berlangsung lebih cepat.

Pada tahun 1945, suatu kelompok studi di *Los Alamos*, Amerika Serikat, memperkenalkan beberapa konsep dasar mengenai kemungkinan terjadinya proses

fusi nuklir di laboratorium [X]. Berdasarkan kOllSCP tersebut manusia kemudian melakukan riset reaksi fusi yang serius. Kegiatan penelitian ini dimulai kira-kira pada tahun 1950 di Inggris, Rusia dan Amerika Serikat. Umumnya kegiatan riset tersebut berada di bawah proyek *Komisi Energi Nuklir*. Pada awalnya, semua kegiatan penelitian fusi ini tergolong proyek rahasia. Namun mulai tahun 1958, pada suatu konferensi internasional kedua tentang penggunaan atom untuk maksud-maksud damai, 110 negara yang terlibat dalam penelitian fusi nuklir melakukan pemberitaan terang-terangan mengenai kerja mereka dalam penelitian fusi nuklir tersebut.

Dalam perjalanan selanjutnya, beberapa pertemuan yang membicarakan perkembangan dalam penelitian fusi nuklir terkontrol telah dilakukan di bawah sponsor Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA) [9]. Pertemuan tersebut dilakukan di *Soltzburg*, Austria tahun 1961 di *Culham*, Inggris tahun 1965, di *Xovosibirsk*, Rusia tahun 1968 dan di *Madison*, Amerika Serikat tahun 1971 serta pertemuan-pertemuan lainnya dalam waktu-waktu berikutnya. Persetujuan untuk melakukan kerjasama yang lebih dekat dalam penelitian fusi nuklir ditandatangani dalam pertemuan puncak antara Amerika Serikat dan Rusia pada tahun 1973. Saat ini kegiatan mengenai riset fusi sedang giat dilakukan secara besar-besaran di beberapa negara maju, seperti Amerika Serikat, Rusia, Inggris, Perancis, Jerman, Italia dan Jepang. Beberapa penelitian fusi skala kecil juga dilakukan di Australia, Denmark, Netherlands, Polandia, Swedia dan Switzerland.

Untuk mendapatkan reaksi fusi di muka bumi, para peneliti lebih cenderung menggunakan bahan bakar fusi berupa isotop-isotop hidrogen yaitu deuterium (D) atau ^2H dan tritium (T atau ^3H). Salah satu jenis reaksi yang cukup mendapatkan perhatian adalah reaksi jenis D-T, karena penampang lintang tumbukannya relatif tinggi sehingga proses fusinya dapat berlangsung pada temperatur yang relatif rendah [11]. Ada tiga syarat utama

untuk dapat melangsungkan reaksi fusi di dalam reaktor, yaitu [11]:

- Kerapatan partikel (n) yang tinggi. Jumlah partikel yang berinteraksi (D maupun T) persatuan volume harus cukup besar untuk mendapatkan frekuensi tumbukan antar partikel yang cukup tinggi.
- Temperatur plasma (T) yang tinggi. Proses fusi pada prinsipnya adalah penggabungan dua inti yang sama-sama bermuatan listrik positif sehingga keduanya cenderung saling tolak-menolak. Oleh sebab itu partikel yang akan direaksikan harus mempunyai cukup energi untuk menembus rintangan Coulomb bersama. Dalam pembahasan mengenai fusi, temperatur sering kali dinyatakan dengan nilai energi kT (bukan $1/2 kT$). Temperatur plasma (5 keV misalnya) setara dengan 7.5×10^7 K.
- Waktu pengungkungan (τ) yang lama. Pengungkungan plasma dimaksudkan agar kerapatan dan temperaturnya tetap tinggi.

Dari ketiga persyaratan tersebut, dua persyaratan yaitu temperatur plasma dan waktu pengungkungan masih merupakan kendala utama dalam mewujudkan proses fusi dalam suatu reaktor.

Dalam matahari, reaksi fusi inti-inti H terkungkung oleh tekanan gravitasi matahari yang luar biasa besarnya. Tekanan setinggi itu tidak dapat diusahakan dalam eksperimen untuk mengontrol reaksi fusi di muka bumi. Itulah salah satu kendala yang dihadapi manusia untuk mewujudkan proses fusi berantai terkendali di muka bumi, yaitu mengontrol dan mempertahankan reaksi pada suhu yang demikian tinggi. Tidak ada satupun jenis material yang mampu bertahan dan dapat dipakai sebagai dinding pengungkungan proses fusi yang berlangsung pada temperatur puluhan hingga ratusan juta K.

Pada temperatur hingga ratusan juta K, atom akan terionisasi sempurna, elektron-

elektron pada kulit atom terlepas dari ikatannya, sehingga terbentuklah apa yang disebut plasma. Satu-satunya cara untuk mengungkung plasma super panas tersebut adalah dengan medan magnet yang sangat kuat. Pendekatan cara ini dikenal dengan nama pengungkung magnetik (*magnetic confinement*) [10]. Medan magnet dapat menghasilkan tekanan yang efektif untuk mengungkung plasma dengan tekanan sebanding dengan kuat medan magnetnya. Meskipun ada biasasan praktis dalam menghasilkan medan magnet kuat pada volume yang besar, namun cara ini tetap dianggap paling praktis dibandingkan dengan metoda pengungkungan plasma lainnya.

Masalah lain yang dihadapi dalam mengupayakan reaksi fusi adalah kemampuan untuk mengontrol agar reaksi fusi tersebut berlangsung secara berantai. Pada saat temperatur plasma mencapai titik yang memungkinkan terjadinya reaksi fusi, energi panas yang dilepaskan dari proses fusi tersebut harus cukup tinggi untuk mempertahankan temperatur dan melangsungkan proses fusi berikutnya [11]. Dalam hal ini ada satu titik kritis yang disebut kriteria Lawson yang pertama kali diperkenalkan oleh ilmuwan Inggris (J.F.) Lawson pada tahun 1958. Kriteria Lawson mengatakan bahwa untuk operasi praktis dalam proses fusi, pelepasan energi nuklir dari proses fusi harus melampaui jumlah energi yang diperlukan untuk memisahkan agar bahan bakar fusi tetap berada dalam bentuk plasma. Kriteria Lawson mengatakan bahwa reaksi termonuklir akan berlangsung apabila diperoleh nilai $n\tau > () \times 10^{13} \text{ s.cm}^{-1}$.

Oleh kriteria Lawson tadi kita dihadapkan pada dua pilihan untuk mendapatkan reaksi termonuklir, yaitu melakukan pengungkungan partikel dalam jumlah besar dalam waktu yang relatif singkat, atau menurunkan kerapatan partikel dengan waktu pengungkungan yang lebih lama, sambil tetap memisahkan temperatur plasma. Untuk reaksi jenis O-T, titik kritisnya mempunyai nilai minimum pada plasma bertemperatur kira-kira 200 juta K, sedang reaksi jenis O-O,

titik kritisnya mempunyai nilai minimum kira-kira 1.000 juta K.

Reaktor Fusi (Tokamak)

Untuk mendapatkan reaksi fusi terkendali, pada awal tahun 1950-an ilmuwan Rusia Lev Artsimovich mengembangkan reaktor fusi yang disebut Tokamak [3]. Istilah tokamak merupakan akronim dalam bahasa Rusia yang berarti kamar magnetik toroida (*toroidal magnetic chamber*). Reaktor ini menyerupai kue donat raksasa yang dilengkapi dengan sistem vakum dan medan magnet tinggi. Dalam pengujian, tokamak ini sejak tahun 1968 mulai mendapatkan perhatian internasional setelah sukses besar dalam pengungkungan plasma dengan magnet dipublikasikan. Selanjutnya konsep tokamak ini mengilhami program-program penelitian fusi di negara-negara maju lainnya, seperti Amerika Serikat, negara-negara Eropa Barat dan Jepang.

Negara-negara Eropa Barat telah melakukan kerja sama dalam penelitian fusi dan mengembangkan sistem reaktor fusi yang disebut JET (*Joint European Torus*) di Culham, Inggris [12]. Selanjutnya pada tahun 1993, Eropa Barat juga merencanakan membangun NET (*Next European Torus*), yang diharapkan dapat mulai dioperasikan pada akhir tahun 2000 mendatang. Di Jepang, penelitian fusi ditangani oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*) dan di sana dikembangkan JT-60U (*Joint Tokamak*). Reaktor fusi dengan diameter sebelah luarnya 15 m dengan volume plasma 60 m³ dan berat 5.000 ton ini mulai beroperasi pada tahun 1985 [12]. Rusia mengembangkan T-15 yang dibangun dekat Moscow. Amerika Serikat mengoperasikan TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*) yang dibangun di Princeton. Fasilitas ini beroperasi sejak tahun 1980 dan memiliki jari-jari utama torus 2,5 m.

Beberapa penelitian mengenai fusi yang telah dilakukan mulai mencakup hasil yang menggembirakan [11]. Laboratorium fisika plasma Universitas Princeton

misalnya, melaporkan hasil penelitiannya mengenai sukses pencapaian suhu plasma hingga 2000 juru K secara terkontrol. Dalam operasi penuh, TFTR itu nunpu mencapai koefisien Lawson setinggi $(10^{21}) \times 10^{17} \text{ s.cm}^3$ pada temperatur plasma kira-kira 1 ke V. Nilai itu juga pernah dicapai pada tahun 1983 di Massachusetts Institute of Technology (MIT). Temperatur yang bisa dicapai ini melebihi temperatur di dalam teras matahari. Sedang waktu pengungkungan plasmanya selama 100 ms. Pada tahun 1994, TFTR marupu menghasilkan 9 MW-daya fusi selama 240 mis. Keberhasilan tersebut cukup menakjubkan. mengingat 20 tahun sebelumnya (tahun 1975) daya fusi yang bisa dicapai kurang dari 0.1 W.

Jepang dengan menggunakan JT-60 juga telah sukses mencapai target yang direncanakan, yaitu mendapatkan kondisi pemanasan bahan bakar fusi agar berada dalam bentuk plasma [3]. Target berikutnya yang ingin dicapai oleh Jepang adalah mewujudkan kondisi pembakaran (*ignition conditions*), dengan mesin yang dinamakan FER (*Fusion Experimental Reactor*). Bahan bakar fusi yang sebenarnya, yaitu D dan T untuk penama kalinya akan digunakan dalam FER ini, dan pembakaran O-T yang sebenarnya dapat diamati melalui percobaan ini.

Dalam upaya pengembangan reaktor fusi adanya pengembangan sistem pencincinan maupun teknologi lain yang berhubungan dengan proses fusi. Pelaksanaan pengembangan tersebut harus dilakukan bersama-sama dengan kegiatan penelitian plasma. Pengembangan teknologi yang diperlukan untuk mensukseskan program FER di Jepang seperti teknologi magnet superkonduksi dan teknik penanganan T telah mulai dilakukan. Dalam program fusi Jepang juga merencanakan untuk membangun *Experimental Reactor Operation* yang diharapkan dapat beroperasi mulai tahun 2000 mendatang. Program tersebut akan disusul dengan pembangunan *Proto Type Reactor*, kemudian dilanjutkan dengan pembangunan *Demonstration Reactor*, selngga sampailah pada, sasaran akhir dalam

pemanfaatan energi fusi *COLI/mercia/ Reactor* f3].

Perhatian utama dalam riset bidang termonuklir ini ditarahkan untuk mendapatkan gambaran yang lengkap tentang tingkah laku plasma pada temperatur yang sangat tinggi. Masalah pengungkungan plasma dan sistem pemanasan plasma pada temperatur ultra tinggi belum terselesaikan dengan tuntas, sehingga penelitian yang bersifat eksperimental maupun teoritis masih terus dilakukan di negara-negara maju. Meskipun masih mengalami hambatan teknis yang tidak ringan, proses reaksi fusi tetap menarik perhatian. Kerja sama tersebut berada dibawah koordinasi IAEA maupun kerja sama bilateral antara beberapa negara. Jepang dan Amerika Serikat misalnya, melakukan kerja sama bilateral dalam program MTX (*Microvav Tokomax Experiments*), yang dimulai pada tahun 1989 untuk mempelajari sistem pemanasan plasma menggunakan laser elektron bebas (*free electron laser*) yang dilakukan di Lawrence Livermore National Laboratory, di Amerika Serikat [2].

Kerja sama internasional dalam penelitian fusi ini mutlak diperlukan, mengingat pengembangan reaktor fusi memerlukan penelitian bertahun-tahun dengan biaya dan sumber daya manusia yang sangat besar. Di samping itu, penelitian masalah fusi ini mencakup berbagai bidang ilmu pengetahuan dan teknologi yang sangat luas. Deugau kerja sama itu dapat dihindari terjadinya duplikasi penelitian yang tidak diperlukan dalam bidang riset dan pengembangan teknologi fusi. Dengan kerja sama ini pula pengeluaran biaya penelitian yang sangat besar dapat ditekan.

Pe nut u l)

Ambisi manusia untuk menguasai teknologi fusi terkendali, dapat difahami dari uraian sederhana sebagai berikut. Deuterium sebagai bahan bakar utama reaktor fusi banyak tersedia di alam dengan kelimpahan kira-kira 6.000 atom H. Deuterium dapat dipisahkan dari atom H

dengan biaya yang relatif murah. Dari perhitungan sederhana diketahui bahwa dalam 1 liter air terdapat kira-kira 125 gram D. Jika D ini dipakai untuk melangsungkan reaksi fusi, akan dihasilkan energi yang besarnya sama dengan energi yang dihasilkan dari pembakaran 170 liter bensin. Total persediaan D di lautan diperkirakan 10¹¹ galen dan energi yang terkandung di dalamnya adalah sebesar 10²¹ kW-tahun.

Perhitungan lain dengan menganggap tiap atom D dapat melepaskan energi sebesar 7 MeV, maka jumlah energi yang dapat dibangkitkan dari seluruh D yang terdapat dalam 1 liter air laut adalah sebesar 12,5 x 10¹¹ J. Sebagai perbandingan, satu barrel minyak mentah hanya menghasilkan energi sebesar (1 x 10⁹) J. Dengan membandingkan kedua data tersebut maka 1 liter air laut mengandung energi fusi yang setara dengan 2 x 10¹¹ barrel minyak mentah, atau 1 km³ air laut dapat menghasilkan energi yang setara dengan 2 x 10¹¹ barrel minyak. Volume air laut di planet bumi ini sekitar 1,5 x 10²¹ km³ dan energi yang terkandung di dalamnya bila dibangkitkan melalui reaktor fusi adalah lebih dari satu milyar kali energi yang dapat dihasilkan oleh seluruh cadangan minyak dunia.

Teknologi fusi juga memiliki sistem keamanan terpadu yang melakat pada proses fusi tersebut. Kondisi untuk melangsungkan reaksi fusi adalah begitu spesifik sehingga kemungkinan terjadinya reaksi fusi tak terkendali dalam reaktor fusi dapat dihindari. Selain itu, apabila terjadi sesuatu yang tidak beres dalam reaktor fusi, atau operator membuat kesalahan dalam mengoperasikan reaktor, reaksi fusi dapat berhenti dengan sendirinya. Sukses dalam pembuatan dan pengoperasian reaktor fusi akan memberikan keuntungan yang sangat besar, yaitu:

- Reaktor fusi akan memproduksi energi dengan memanfaatkan bahan bakar yang sangat murah dan terdapat di alam dalam jumlah yang sangat melimpah.
- Radioaktivitas yang berhubungan dengan pengoperasian reaktor fusi akan jauh

lebih rendah dibandingkan dengan yang dikluarkan dalam pengoperasian reaktor fisi, sehingga masalah penanganan limbah radioaktif akan jauh lebih sederhana.

- Hanya sedikit bahan bakar fusi yang dibakar di dalam reaktor, sehingga tidak akan terjadi ledakan seperti halnya bom hidrogen.
- Bahan bakar fusi tidak dapat dimanfaatkan secara langsung untuk pembuatan senjata nuklir, sehingga dapat dihindari kemungkinan terjadinya penyebaran senjata nuklir atau jatuhnya bahan bakar fusi ke pihak yang tidak bertanggungjawab.

Daftar Pustaka

1. ALONSO, M. and FINN, E.J., Fundamental University Physics (volume III), Addison-Wesley Publishing Company, London (1970).
2. WHITE, ORAN R. Matahari, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. I, Grolier International Inc./P.T. Widyanuklid (1977) hal 5-7X.
1. KAPLAN, I., Nuclear Physics (2nd edition), Addison-Wesley Publishing Company, London (1971).
4. KRANE, KENNETH S., Fisika Modern (cetakan 1, terjemahan oleh Hans G. Wosapatrik & Sofia Niksolihin), Penerbit Universitas Indonesia, Salemba, Jakarta 10.130 (1972).
5. KNIEF, R. ALLEN, Nuclear Energy Technology, Hemisphere Publishing Corporation, Washington (1971).
6. CROMIE, WILLIAM J., Energy Fusi, Ilmu Pengetahuan Populer, Vol. I, Grolier International Inc./P.T. Widyanuklid (1977) hal 2X0-2X2.
7. MURRAY, RAYMOND L., Nuclear Energy, Pergamon Press, Oxford (1970).
- X. ENCYCLOPEDIA AMERICANA, Vol. 1, pp. 511h-52X, Americana Corporation, Connecticut, USA (1973).

- IJ. McGRAW-HILL ENCYCLOPEDIA OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (Sixth edition). Vol. 1). McGraw-Hill Book Company. New York (1972) pp. 2(X-1-1S.
- I(). TA YLOR., JOHN R. and ZAFIRATOS., CHRI D.. Modern Physics For Scientist and Engineers. Prentice Hall Englewood Cliffs. New Jersey (1962) (1991)
- II. SPEARS., BILL Fusion Through the NET. New Scientist (November 1977)pp.56-60
12. ANONIM. Naka Fusion Research Establishment. Japan Atomic Energy Research Institute. Japan.
13. ANONIM. Research Reactor. Current Status and Their Major Role. Tokai Research Establishment. Japan Atomic Energy Research Institute. Japan.